

多模态超声在男性尿道狭窄诊断中的应用

张容萍¹, 薛宇红², 刘 莉^{2*}

¹西安医学院研究生院, 陕西 西安

²陕西省人民医院超声诊断中心, 陕西 西安

收稿日期: 2026年6月2日; 录用日期: 2026年6月26日; 发布日期: 2026年7月6日

摘 要

男性尿道狭窄精准术前评估对术式选择至关重要, 传统X线造影无法显示海绵体纤维化等软组织信息。多模态超声无辐射、实时动态且软组织分辨率较高, 可作为补充甚至替代手段。本文系统阐述超声尿道造影(SUG)、经尿道对比增强超声(CEUS)、超声弹性成像及三维超声的应用进展。现有证据提示: SUG可较准确评估前尿道狭窄长度及纤维化范围, 决策价值可能优于X线造影; CEUS通过微泡造影剂提升管腔边界显示, 狭窄长度与术中实测高度相关; 剪切波弹性成像可定量海绵体硬度; 初步证据表明AI辅助三维超声可将重建时间缩短至分钟级, 提供立体解剖信息。多模态超声在后尿道显示、检查流程标准化及高级别证据方面仍面临瓶颈。本文提出分层递进临床决策路径及未来研究方向。

关键词

尿道狭窄, 多模态超声, 超声尿道造影, 对比增强超声, 弹性成像, 三维超声

Application of Multimodal Ultrasound in the Diagnosis of Male Urethral Stricture

Rongping Zhang¹, Yuhong Xue², Li Liu^{2*}

¹School of Graduate, Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Ultrasound Diagnosis Center, Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: June 2, 2026; accepted: June 26, 2026; published: July 6, 2026

Abstract

Precise preoperative assessment of male urethral strictures is essential for surgical decision-making, yet conventional X-ray urethrography fails to reveal soft-tissue details such as spongiositis.

*通讯作者。

文章引用: 张容萍, 薛宇红, 刘莉. 多模态超声在男性尿道狭窄诊断中的应用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(7): 308-318.
DOI: 10.12677/acm.2026.1672528

Multimodal ultrasound, being radiation-free, real-time, and offering high soft-tissue resolution, may serve as a complementary or alternative tool. This review summarizes advances in sonourethrography (SUG), transurethral contrast-enhanced ultrasound (CEUS), ultrasound elastography, and three-dimensional (3D) ultrasound. Evidence indicates that SUG can reliably measure anterior stricture length and fibrosis extent, potentially outperforming X-ray urethrography in guiding treatment. CEUS improves luminal border visualization via microbubble contrast agents, with stricture length correlating closely with intraoperative findings. Shear-wave elastography quantifies spongiosal stiffness, and preliminary data suggest that AI-assisted 3D ultrasound can reduce reconstruction time to minutes while providing stereotactic anatomical detail. Nevertheless, multimodal ultrasound still faces limitations in posterior urethral visualization, procedural standardization, and high-level evidence. The article proposes a stepwise clinical decision-making pathway and outlines future research directions.

Keywords

Urethral Stricture, Multimodal Ultrasound, Sonourethrography, Contrast-Enhanced Ultrasound, Elastography, Three-Dimensional Ultrasound

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

尿道狭窄男性患病率约 0.2%~0.9%，55 岁以上可近 1% [1]。病因呈地域差异：发展中国家以外伤性为主，欧美医源性损伤居多，我国医源性比例亦逐年上升[2]-[5]。病理核心为海绵体纤维化，即尿道黏膜及海绵体被纤维瘢痕取代[6]。临床表现为尿流减弱、排尿困难及反复感染，复发率高，严重影响生活质量[7]。术前精准评估狭窄位置、长度及纤维化程度是制定个体化方案的关键[8]。

传统影像学方法如 X 线逆行尿道造影(Retrograde Urethrography, RUG)、多层螺旋 CT 尿道成像(Computed Tomography Urethrography, CTU)及磁共振尿道成像(Magnetic Resonance Urethrography, MRU)各有局限：辐射暴露、软组织分辨率不足或检查条件苛刻。超声凭借无辐射、实时动态等优势，已从单纯管腔显示发展为涵盖超声尿道造影(Sonourethrography, SUG)、经尿道逆行灌注对比增强超声(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)、弹性成像及三维超声的多模态评估体系，分别从管腔形态、边界增强、组织硬度及立体解剖四个维度超越传统成像[9]-[11]。然而，该体系转化仍面临尿道解剖性盲区、检查标准缺失、多数研究为单中心小样本等瓶颈[12]。本文系统阐述上述技术进展，分析证据与争议，提出临床决策路径与研究方案。

2. 尿道狭窄传统影像学诊断现状

RUG 联合排尿性膀胱尿道造影(Voiding Cystourethrography, VCUG)是传统金标准，获 SIU/ICUD 和 EAU 指南推荐[13] [14]。但 RUG 易系统性低估狭窄长度：一项 130 例研究显示，膜部和球部分别低估 4.77 mm 和 7.32 mm [15]；另一项研究(n = 29)亦证实平均低估近 1 cm，47%病例因此变更术式[16]。此外，RUG 完全无法评估海绵体纤维化[17]，使 SUG 凭断面成像直接显示管壁层次的优势凸显。

CTU 可展示狭窄与骨性结构的三维关系，对创伤性后尿道缺损有价值，但辐射剂量约 5~6 mSv，软组织对比不及 MRI，常作为二线选择[18] [19]。MRU 软组织分辨率高，可清晰显示纤维化范围与断端错

位，是后尿道闭锁评估的有效工具[20][21]，但检查耗时、费用高且有禁忌症。El-Ghar 等[22]比较 MRU 与 RUG 联合超声后认为两者效能相当，为超声替代 MRU 提供了依据。综上，RUG 缺乏软组织信息，CTU 有辐射代价，MRU 可及性受限[23]，多模态超声由此发展。传统方法对比见(表 1)。

Table 1. Comparison of diagnostic performance, levels of evidence, and applicable scenarios of conventional imaging modalities in the assessment of urethral stricture

表 1. 传统影像学方法在尿道狭窄评估中的诊断效能、证据等级与适用场景对比

技术名称	敏感性/特异性/准确性	研究类型/证据等级	适用场景	技术局限性
RUG	前尿道: Sen 91%, Spe 90%, Acc 90%; 后尿道: Sen 89%, Spe 91.7%, Acc 90% (针对狭窄部位及存在性的诊断效能) [22]	单个前瞻性队列研究 (IIb) [22]; 专家共识 (IV) [13]	一线筛查; 评估狭窄位置、长度、数量; 发现憩室、结石及假道; 联合 VCUG 实现全尿道评估[13]	二维投影, 有辐射, 无法评估海绵体纤维化, 易低估狭窄长度[13]
CTU	Sen 95.7%, Spe 94.1%, Acc 95% (以 VCUG 为参照) [24]	横断面比较研究(III) [24]; 病例系列(III) [18]	复杂性后尿道狭窄术前规划, 显示狭窄与骨性结构关系[24]	有电离辐射; 软组织对比不及 MRI [18]
MRU	Sen 100%, Spe 91.7%, Acc 95% (针对狭窄部位及存在性的诊断效能) [22]	单个前瞻性队列研究 (IIb) [22] [25]	创伤性后尿道狭窄, 精准评估断端错位与纤维化[25]	检查时间长、费用高; 有幽闭恐惧症、心脏起搏器等禁忌[22]

注: 证据等级依据牛津循证医学中心标准。Sen = 敏感度; Spe = 特异度; Acc = 准确率。

3. 多模态超声技术的应用进展与技术演进逻辑

3.1. 超声尿道造影：从管腔显示到海绵体评估的跨越

RUG 为二维投影，2018 年前瞻性研究(n = 66)显示前尿道狭窄术中实测平均 31.1 mm，而 RUG 为 16.4 mm，低估近 50% [26]。SUG 通过灌注生理盐水建立声窗，高频探头同步显示管腔与海绵体。该技术由 McAninch 等[27]于 1988 年首次报告，Morey 与 McAninch [28]建立基于纤维化深度的超声分期体系及皮瓣宽度公式使其成为术前决策框架。Bryk 等[29]报告前尿道诊断准确率 100%，后尿道仅 60%，故适用范围主要限于前尿道。

Buckley 等[30]回顾性分析(n = 232)报告 SUG 改变 45%的手术方案，但存在选择偏倚。Miszewski 等[31]前瞻性研究(n = 170)显示 SUG 长度估计与术中符合率 81.8%，操作者经验为独立影响因素。Geavlete 等[32]的 RCT (证据等级 Ib)证实术前超声引导可降低内切开后复发率。Heidenreich 等[33]大样本前瞻性研究(n = 175)报告敏感度 98%、特异度 96%；Gupta 等[34]以术中实测为金标准，SUG 检测海绵体纤维化的分层准确率轻度 43%、中度 56%、重度 83%，表明对轻度纤维化分辨不足需弹性成像补充。

SUG 后尿道受限，Mikolaj 等[35]发现测量误差主要集中球部及膜部。灰阶超声无法量化硬度，驱动弹性成像引入。Sehgal 等[36] (n = 30)证实 RUG 联合 SUG 后 31.2%病例手术方案改变。针对上述局限，未来研究应聚焦 SUG 操作流程的标准化方案。需设计多中心诊断准确性研究，统一探头频率(9~15 MHz)、灌注速率(2~5 ml/s)及扫查切面(不少于 3 个)，以术中组织病理为金标准，建立 SUG 海绵体纤维化分级的标准化判读标准，并进行外部验证，操作流程可参照 Krukowski 等[26]的方案。为明确 SUG 联合 RUG 策略的附加价值，需开展以术式选择改变率为主要终点的前瞻性研究，纳入前尿道狭窄患者，预设操作者经验分层，以控制操作者偏倚。

3.2. 经尿道对比增强超声：从模糊边界到精准测长

SUG 依赖组织本征回声，边界判读主观性强。CEUS 经尿道逆行灌注微泡造影剂，利用非线性谐波信号客观界定管腔边界。Chung 等[37]单中心 30 例前瞻性研究以术中实测为金标准，CEUS 与术中长度相关性 $R^2 = 0.71$ ，优于 SUG 的 0.47 和 RUG 的 0.106，术后复发检出准确率达 93%。

CEUS 测长优势虽获认可，但其能否替代 SUG 成为独立术前评估工具仍存争议。支持方以 $R^2 = 0.71$ 及单人操作的钳夹法[38]可行性为据；反对方则指出，完全闭塞性狭窄时造影剂无法通过远端梗阻段，且所有证据均来自经验丰富操作者的单中心研究[39]。何萍等[39]回顾性研究观察到 CEUS 与术中长度及并发症检出的一致性，但存在选择偏倚，需多中心前瞻性队列预设操作者经验分层验证其测长精度。

CEUS 存在完全闭塞性狭窄时的诊断盲区[39]，且无法量化海绵体纤维化硬度，因此推动其与剪切波弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)联合，以同步提供狭窄长度与硬度信息。国内邓超等[40]的回顾性研究(120 例)提示联合方案可行，但回顾性设计限制因果推断。为验证 CEUS 联合 SWE 双参数方案能否优化术式选择与预后，可开展多中心前瞻性 RCT。纳入球部前尿道狭窄(长 1~4 cm)拟行内切开或端端吻合术的患者，按 1:1:1 随机分为单纯 RUG 组、SUG 联合 SWE 组、SUG 联合 CEUS 及 SWE 组。主要终点为术后 12 个月无复发生存率，次要终点包括手术方案改变率及 IPSS、QoL 评分。按无复发生存率从 70%提高至 85%估算，每组至少需 77 例(共 231 例)[32]，主要分析采用 Kaplan-Meier 和 log-rank 检验。该设计可回答 SUG + SWE 对 RUG 的增益及加用 CEUS 的进一步增益；同时可借鉴 Chung 等[37]的方法，分析 CEUS 联合 SWE 测值与术中实测的相关性，并通过大样本 ROC 确定 CEUS 灌注参数的标准化 cut-off 值。

3.3. 超声弹性成像：从定性观察到定量生物力学评估

弹性成像由 Ophir 等[41]建立理论基础，使超声获取组织硬度生物力学参数。应变弹性成像(Strain Elastography, SE)通过手动施压定性反映相对硬度；SWE 利用声辐射力脉冲直接计算弹性模量(kPa)，输出绝对定量，跨操作者一致性好[42]。Talreja 等[43]回顾性研究(63 例)以组织病理为金标准，SE 蓝色模式与重度纤维化一致性 100%，绿色模式与中度纤维化一致性 87.5%，提示区分纤维化程度的能力，但 SE 操作者依赖性促使向 SWE 转变。

Tondro Anamag 等[44]前瞻性研究($n = 22$)显示狭窄区弹性值显著高于正常海绵体($p < 0.0005$)，距狭窄 1 cm 处硬度也高于 3 cm 处($p = 0.002$)，证实 SWE 可定量反映硬度梯度。但样本量小，未建立正常参考范围及诊断阈值。SWE 提供连续 kPa 值，有潜力突破轻度纤维化识别瓶颈。

当前尿道 SWE 评估面临单中心小样本、正常参考范围缺失、测量协议未标准化及二维取样空间偏倚等局限[12][44]。为确定纤维化分级临界值，需设计多中心诊断准确性研究：统一前尿道扫查参数，以术中组织病理为金标准，遵循 WFUMB 指南[42]通过 ROC 曲线确立 kPa 阈值并外部验证。还需开展不少于 150 例的前瞻性队列，统一 SWE 测量参数(ROI 直径 3 mm、深度 ≤ 3 cm、3 次均值)，术前获取海绵体硬度分级，术后随访 ≥ 12 个月，以多因素 Cox 回归(协变量包括年龄、糖尿病、狭窄位置及闭塞程度[31])验证 SWE 分级对复发的独立预测价值，其可行性已初步验证[40]。

3.4. 三维超声成像：从二维断面到立体重建的维度升级

SUG 与弹性成像共享单切面缺陷，无法呈现纤维化的空间分布。Chen 等[45]2018 年单中心前瞻性研究(50 例)以高频断层扫描建立尿道三维模型，长度测量与术中高度相关，首次输出纤维化立体空间分布。冯超等[46]回顾性研究(121 例)证实三维重建联合仿真内镜的显示价值，但未证实改变手术方案。三维超声仅适用于前尿道。

手工重建耗时逾 24 小时[45]，驱动 AI 辅助自动分割。Feng 等[47] 2024 年将 nnU-Net 算法引入三维 SUG，63 例前尿道狭窄重建时间约 5 分钟，DICE 系数 0.85，与术中长度相关性 $r=0.87$ 。争议在于所有研究均未报告三维信息是否导致手术方案改变或改善患者结局。

三维超声的核心局限在于 AI 模型证据仅基于单中心同质数据，跨中心适用性未知[47]。验证路径分三步：内部验证将数据按 7:3 划分，以 $DICE \geq 0.85$ 和狭窄长度测量相关性 $r \geq 0.85$ 为主要指标，比较 AI 与人工重建的耗时与准确率；多中心外部验证纳入 ≥ 3 个中心、 ≥ 200 例前尿道狭窄患者，覆盖不同病因并使用至少两种超声设备，以术中实测长度为金标准，评价 95%一致性界限和 DICE 系数；前瞻性 RCT 将患者随机分为 AI 辅助诊断组和传统影像组(RUG 联合 SUG)，以术后 12 个月无复发生存率为主要终点，次要终点包括术式改变率、操作时间、住院日和临床决策一致性(Kappa 系数)，每组约需 200 例。术中应用方面，郝云武等[48]报告了三维模型联合经直肠超声实时导航辅助球膜部端端吻合定位，但缺乏对照组。未来应开展前瞻性队列研究，试验组基于三维超声构建个体化 3D 打印模型用于术前模拟与术中导航(后尿道显示不清时融合 MRI)，以术中实测验证空间精度(绝对误差 $< 2\text{ mm}$ ， $r \geq 0.90$)；对照组仅依靠 RUG + VCUG，比较两组探查时间及直肠损伤率。

3.5. 多模态超声的整合应用：分层递进的技术组合与决策逻辑

尿道狭窄评估需同步获取长度、硬度与灌注信息，宜采用分层递进、按需组合策略。一线为前尿道 SUG 联合 SWE，SWE 独立增量价值有待验证[44]。当边界模糊时引入 CEUS，其长度相关性优于 SUG，完全闭塞时则需三维超声补充空间信息。AI 辅助三维重建已可 5 分钟内完成[47]。核心缺陷在于硬度 - 灌注 - 三维递进链中各环节证据断层：SWE 缺诊断阈值，CEUS 缺标准化 cut-off，三维导航受制于多模态融合误差。未来应开展多中心前瞻性队列验证 SUG + SWE + CEUS 组合的增量价值，确立各参数阈值，开发以超声为单一数据源的三维多模态融合导航系统。各技术证据汇总见(表 2)，特点对比见(表 3)。

Table 2. Summary of representative research evidence on multimodal ultrasound techniques in the diagnosis of urethral stricture

表 2. 多模态超声技术在尿道狭窄诊断中的代表性研究证据汇总

技术	作者/年份	研究类型	例数	狭窄位置	操作者经验	设备/探头	诊断标准	操作流程	患者选择 纳入/排除	敏感性(%)/ 特异性(%)/ 准确性(%)	关键发现	研究质量
SUG	Heidenreich 1994 [33]	前瞻性	175	前尿道	未报告	高频线阵	RUG 对照	逆行灌注	前尿道狭窄	98/96/- (狭窄检出)	超声简便、廉价、无辐射，应作为前尿道评估首选	高
	Morey 2000 [28]	综述	-	前尿道	高年资	高频线阵	术中对 照	逆行灌注	前尿道狭窄	-	建立 SUG 分期体系及皮瓣宽度公式，可直接显示海绵体纤维化、结石、假道	低
	Gupta 2006 [34]	前瞻性	52	前尿道	未报告	高频线阵	术中及 RUG 对照	逆行灌注	前尿道狭窄	-	SUG 测量的平均长度(3.8 cm)更接近术中(3.5 cm)，检测纤维化优于 RUG	高
	Buckley 2012 [30]	回顾性	232	前尿道	高年资	高频线阵	术中对照	逆行灌注	前尿道成形术	-	SUG 改变了 45%患者的手术方案	中
	Mikolaj 2021 [35]	前瞻性	55	前 + 后尿道	两名医师	高频线阵	术中对照	逆行灌注	排除无法 MRI 者	-	MRU 最准确，VCUG + SUG 为最优组合	高

续表

	Frankiewicz 2024 [12]	综述	17 项	前尿道 为主	多名 医师	多种	术中 对照	逆行 灌注	仅 前瞻性	-	超声经济安全可三维动态 评估, 后尿道价值有限; 纳入研究质量有限	中
	Chitrakar 2025 [49]	前瞻性	56	前尿道	未报告	高频 线阵	术中	逆行 灌注	前尿道 狭窄	-/-/98 (定位 准确率)	SUG 长度 13.5 mm vs RUG 5.8 mm, 定位 准确率 98%	高
	Miszewski 2025 [31]	前瞻性	170	前尿道	一名 医师	高频 线阵	术中	逆行 灌注	前尿道 狭窄	-/-/81.8 (术中 符合率)	SUG 精度受年龄、 糖尿病、位置、闭塞 程度、纤维化分级影响	高
CEUS	Berná- Mestre 2018 [38]	前瞻性	113	前 + 后尿道	高年资	高频 线阵	RUG/V CUG 对照	逆行 + 顺 行(钳 夹法)	男性 (14-86 岁), 尿道 造影 确诊 狭窄	-	6 分钟完成逆行膀胱 充盈, RSUG 检出前尿道 狭窄优于 RUG ($p < 0.05$), CE-VSUG 检出后 尿道狭窄优于 VCUG ($p < 0.05$)	高
	Chung 2022 [37]	前瞻性	28	球部	未报告	高频 线阵, Aplio i800 系统	术中 金标准	逆行 灌注	球部 狭窄, 排除 后尿道/ 闭塞	80/100/93 (狭窄检出)	联合 SWE 实现对海绵体 纤维化的定量评估(kPa 值), CEUS 测量长度与 术中相关性最佳($R^2 = 0.71$), 可能用于预测 术后复发	中
	邓超 2025 [40]	回顾性	120	前 + 后尿道	未报告	高频 CEUS/ SWE 探头	术中 对照	逆行 灌注	前 + 后 尿道 狭窄	-	CEUS 联合 SWE 能 多维度评估狭窄及 纤维化, 提供更全面的 术前信息	中
弹性 成像	Talreja 2016 [43]	回顾性	63	前尿道	未报告	高频线 阵	组织 病理学	手动 施压	前尿道 狭窄	-	SE 与病理符合率: 重度纤维化 100%, 中度 87.5%	中
	Tondro Anamag 2024 [44]	前瞻性	22	前尿道	未报告	-	自身 正常 尿道 对照	逆行 灌注	前尿道 狭窄	-	SWE 证实弹性差异($p < 0.0005$); 距狭窄 1 cm 硬度高于 3 cm ($p = 0.002$); 与病因/年龄 无关	中
三维 超声	Theisen 2016 [11]	综述	-	前尿道	-	多种	-	-	-	-	系统阐述三维成像在尿道 狭窄术前规划中的应用	低
	Chen 2018 [45]	前瞻性	60	前尿道	未报告	高频 线阵 3D	术中 金标准	逆行 灌注	前尿道 狭窄	-	首次建立直观 3D 尿道 模型并显示海绵体纤维 化, 但手工重建需>24 小时	高
	Feng 2024 [47]	前瞻性	63	前尿道	AI 自动化	高频 线阵 3D + 线性步 进电机	术中 金标准	逆行 灌注	前尿道 狭窄	-	AI 重建 5 分钟, 与术中 长度 $r = 0.87$, DICE 0.85	高

注: “-”表示原始文献未报告该项数据; 各指标的具体诊断见数据后括号标注: “狭窄检出”指判断是否存在狭窄的敏感度/特异度/准确度; “定位准确率”指狭窄位置判断的正确率; “术中符合率”指超声评估与术中金标准的综合符合率。原始诊断准确性研究的研究质量基于 QUADAS-2 工具评定, 综合病例选择、待评价试验、金标准、病例流程与进展四个领域的偏倚风险后归为三级: 高(各领域均为低偏倚风险)、中(存在中等偏倚风险但无关键缺陷)、低(存在高偏倚风险或关键信息缺失)。综述类文献采用 AMSTAR 2 工具评定, 叙述性综述因缺乏系统方法学评为低质量。

Table 3. Comparison of the characteristics of multimodal ultrasound techniques for urethral stricture
表 3. 尿道狭窄多模态超声技术特点对比

技术名称	优势	局限性	未来方向	适用场景	证据等级
SUG	前尿道诊断准确率高[33]; 可评估海绵体纤维化[28]; 无辐射、成本低、动态多断面扫描[33]; 可改变手术方案[30]	后尿道显示受限 [29]; 操作者依赖性较强, 精度受患者因素和狭窄特征影响 [31]	建立标准化操作流程与纤维化分级体系[26] [28]; AI 辅助测量[47]; 多中心前瞻性验证对术式决策的改善作用[30] [31]	前尿道狭窄的一线筛查与术前评估[28]; 需反复随访避免辐射者 [12]; 联合 RUG 可提升准确率[36]	IIb
CEUS	狭窄长度测量与术中相关性优于 SUG 和 RUG[37]; 可联合 SWE 定量评估纤维化[37]; 术后随访准确率高[37]; 可实现单人操作[38]	完全闭塞或后尿道病变时造影剂无法通过远端[39]; 缺乏统一标准化操作规范 [12]	验证 CEUS 联合 SWE 双参数方案的决策增量价值[32] [37]; 确定 CEUS 灌注参数的标准化 cut-off 值[12]	球部尿道狭窄的精确测长与术后复发监测 [37]; 与 RUG 互补评估多发/长段狭窄[35]	IIb
弹性成像	SWE 可定量输出弹性模量值, 评估海绵体纤维化程度 [37] [44]; SE 可直观显示组织硬度差异, 对重度纤维化诊断符合率高[43]	后尿道应用受限 [12]; SWE 缺乏统一的纤维化分级诊断阈值[44]; SE 主观性强, 为半定量评估 [43]	确定 SWE 纤维化分级的诊断阈值[44]; 验证 SWE 分级对术后复发的独立预测价值[43]	前尿道海绵体纤维化的定量评估, 为术式选择提供客观依据[43]; 联合 CEUS 构建长度 + 硬度双参数评估模型 [37]	IIb (SWE) III (SE)
三维超声	立体显示狭窄长度与容积, 与术中实际长度高度相关 [45] [47]; AI 辅助重建大幅缩短耗时[47]; 3D 打印联合术中导航已初步应用[48]	后尿道显示欠佳 [12]; AI 模型尚未经过外部验证[47]	多中心外部验证 AI 模型的适用性[45] [47]; 验证三维信息对术式决策的增量价值[47]; 验证 3D 打印导航技术的临床效果 [45] [48]	复杂多段狭窄的术前三维规划[45]; 球膜部狭窄的 3D 打印术中导航[48]; AI 自动化处理可降低操作者依赖性[47]	IIb

注: 证据等级参照牛津循证医学中心: IIb = 前瞻性队列研究(以术中/病理为金标准); III = 回顾性研究/病例对照。

4. 多模态超声与传统影像学的比较与整合

4.1. 各技术定位与互补

RUG 联合 VCUG 曾为金标准, 但低估狭窄长度且无法评估纤维化, 观察者间差异大[15] [50]。CTU 可评估狭窄与骨性结构关系, 软组织对比有限[18]。MRU 适用于后尿道闭锁评估, 但成本高、耗时长[22]。SUG 无辐射、可显示管腔外结构, 诊断前尿道狭窄的敏感度可达 97.4%、特异度 94.3% [51], 但后尿道仍需 MRU。Mikolaj 等[35]提出 VCUG + SUG 为前尿道较优组合。CEUS 联合 SWE 可定量评估长度与硬度, AI 辅助三维超声提供快速三维模型, 共同构成阶梯式评估体系: SUG 为前尿道筛查工具, CEUS 与 SWE 提供定量信息, MRU 和 CTU 为后尿道及复杂病例的补充。

4.2. 基于现有证据的临床决策路径建议

综合证据质量与适用场景, 提出分层评估路径见(表 4)。

Table 4. Proposed clinical decision-making pathway for imaging evaluation of urethral stricture
表 4. 尿道狭窄影像学评估的临床决策路径建议

临床场景	首选检查	补充检查	多模态超声优势	证据等级
常规前尿道狭窄(初诊)	SUG	RUG (可选)	无辐射, 精准评估狭窄长度与海绵体纤维化[26] [30]	IIb
需精确纤维化评估	SUG + SWE	CEUS	定量评估海绵体纤维化硬度, 指导术式[37] [44]	IIb

续表

前尿道闭塞/ 复杂术前规划	三维超声 + SUG	AI 辅助重建	立体显示狭窄与纤维化空间关系[45] [47]	I Ib
后尿道/膜部狭窄	RUG + VCUG	MRU	SUG 准确率仅 60% [29]，MRU 可清晰显示闭锁段 [20] [22]	I Ib
术后复发监测	SUG + CEUS	SWE	CEUS 无创精准检测复发[37]	I Ib
特殊人群 (儿童、需反复随访)	SUG	CEUS	无辐射，安全用于儿童及长期随访[52] [53]	I V

5. 总结与展望

5.1. 从形态到功能：技术演进与核心证据

多模态超声已从形态学评估发展为涵盖 SUG、CEUS、弹性成像及三维超声的综合体系。SUG 奠定了前尿道评估基石[27] [28]，诊断敏感度、特异度均较高[33] [51]，但后尿道效能有限[29]。CEUS 提升了狭窄测长准确性[37]，弹性成像拓展至生物力学维度[44]，AI 辅助三维超声将重建时间从小时级降至分钟级[47]。该体系以无辐射、组织量化等优势，推动尿道狭窄影像学从单纯管腔显影向组织特性量化转变。

5.2. 从证据到实践：系统性瓶颈与挑战

三大瓶颈制约临床转化：后尿道因骨盆遮挡存在解剖性盲区，SUG 准确率约 60% [29]；各中心操作与判读缺乏统一标准，操作者依赖性强[12] [31]；CEUS、弹性成像、AI 三维等新技术证据多为单中心小样本，等级 I Ib~III 级[12]，尚无大规模多中心前瞻性验证其改善决策与预后。三者相互交织，需推进跨技术系统性整合研究。

5.3. 从瓶颈到突破：有待开展的系统性研究

研究一：多模态超声整合模型的前瞻性验证。需多中心队列纳入 ≥ 300 例前尿道狭窄，每例依次完成 SUG、CEUS、SWE 及 AI 三维，以术中病理和术者决策为参考标准，评价整合模型较单一 SUG 能否提升术式选择准确性。研究二：后尿道超声-MRI 融合导航验证。术前基于 MRI 构建后尿道三维模型[20]，术中经直肠超声实时采集并以骨性标志或球囊对齐实现图像融合，开展 ≥ 80 例前瞻性队列，验证后尿道断端定位精度、手术时间及直肠损伤率。研究三：多模态超声标准化操作共识。调查各中心操作参数变异，由≥10 个中心、≥30 人多学科专家组基于文献和投票(同意率 ≥ 75%)制定探头频率、灌注速率、造影剂推注及 SWE 感兴趣区等推荐规范，为多中心研究提供方法学基础[26] [42]。

参考文献

[1] Luo, H., Lou, K.C., Xie, L.Y., Zeng, F. and Zou, J.R. (2024) Pharmacotherapy of Urethral Stricture. *Asian Journal of Andrology*, **26**, 1-9. <https://doi.org/10.4103/aja202341>

[2] 陈佳伟, 邓欣, 双卫兵. 男性尿道狭窄的病因、诊断及治疗研究进展[J]. 解放军医学杂志, 2020, 45(10): 1099-1104.

[3] Xu, Y.M., Song, L.J., Wang, K., Lin, J., Sun, G., Yue, Z., *et al.* (2015) Changing Trends in the Causes and Management of Male Urethral Stricture Disease in China: An Observational Descriptive Study from 13 Centres. *BJU International*, **116**, 938-944. <https://doi.org/10.1111/bju.12945>

[4] Lumen, N., Campos-Juanatey, F., Greenwell, T., Martins, F.E., Osman, N.I., Riechardt, S., *et al.* (2021) European Association of Urology Guidelines on Urethral Stricture Disease (Part 1): Management of Male Urethral Stricture Disease. *European Urology*, **80**, 190-200. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2021.05.022>

[5] 夏海缀, 翟建坡, 王建伟, 李贵忠, 黄广林, 满立波. 男性尿道狭窄病因及治疗方式 10 年变化的单中心回顾分析

- [J]. 现代泌尿外科杂志, 2024, 29(9): 797-802.
- [6] Grimes, M.D., Tesdahl, B.A., Schubbe, M., Dahmouh, L., Pearlman, A.M., Kreder, K.J., *et al.* (2019) Histopathology of Anterior Urethral Strictures: Toward a Better Understanding of Stricture Pathophysiology. *Journal of Urology*, **202**, 748-756. <https://doi.org/10.1097/ju.0000000000000340>
- [7] Mershon, J.P. and Baradaran, N. (2021) Recurrent Anterior Urethral Stricture: Challenges and Solutions. *Research and Reports in Urology*, **13**, 237-249. <https://doi.org/10.2147/rru.s198792>
- [8] Campos-Juanatey, F., Osman, N.I., Greenwell, T., Martins, F.E., Riechardt, S., Waterloos, M., *et al.* (2021) European Association of Urology Guidelines on Urethral Stricture Disease (Part 2): Diagnosis, Perioperative Management, and Follow-Up in Males. *European Urology*, **80**, 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2021.05.032>
- [9] Suci, M.D., Marica, N.A., Badea, A.F., Gavrilă, I.L. and Badea, R.I. (2020) Retrograde Urethrosonography with Sonovue in Strictures of the Male Urethra: A Pilot Study. *Medical Ultrasonography*, **22**, 424-429. <https://doi.org/10.11152/mu-2483>
- [10] Talreja, S.M., Tomar, V., Yadav, S.S., Jaipal, U., Priyadarshi, S., Agarwal, N., *et al.* (2019) Comparison of Sonoelastography with Sonourethrography and Retrograde Urethrography in the Evaluation of Male Anterior Urethral Strictures. *Urology Research and Practice*, **42**, 84-91. <https://doi.org/10.5152/tud.2016.99223>
- [11] Theisen, K.M., Kadow, B.T. and Rusilko, P.J. (2016) Three-Dimensional Imaging of Urethral Stricture Disease and Urethral Pathology for Operative Planning. *Current Urology Reports*, **17**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1007/s11934-016-0616-0>
- [12] Frankiewicz, M., Vetterlein, M.W., Markiet, K., Adamowicz, J., Campos-Juanatey, F., Cocci, A., *et al.* (2024) Ultrasound Imaging of Male Urethral Stricture Disease: A Narrative Review of the Available Evidence, Focusing on Selected Prospective Studies. *World Journal of Urology*, **42**, Article No. 32. <https://doi.org/10.1007/s00345-023-04760-x>
- [13] Angermeier, K.W., Rourke, K.F., Dubey, D., Forsyth, R.J. and Gonzalez, C.M. (2014) SIU/ICUD Consultation on Urethral Strictures: Evaluation and Follow-up. *Urology*, **83**, S8-S17. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2013.09.011>
- [14] European Association of Urology (2026) EAU Guidelines (Presented at the EAU Annual Congress London 2026). EAU Guidelines Office.
- [15] Salimi, H., Menbari Oskouie, I., Mohammadi, R., Nazarpour, M.J., Niknam, N., Nikoubakht, M.R., *et al.* (2025) Retrograde Urethrography (RUG) Combined with Voiding Cystourethrography (VCUG) versus Surgical Findings in Assessment of Urethral Strictures Length. *Urologia Journal*, **92**, 342-347. <https://doi.org/10.1177/03915603241292840>
- [16] Moncrief, T., Gor, R., Goldfarb, R.A., Jarosek, S. and Elliott, S.P. (2018) Urethral Rest with Suprapubic Cystostomy for Obliterative or Nearly Obliterative Urethral Strictures: Urethrographic Changes and Implications for Management. *Journal of Urology*, **199**, 1289-1295. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.11.110>
- [17] 张林琳. 评估分析男性尿道狭窄的术前诊断手段——尿道造影、超声尿道成像和磁共振尿道成像, 谁是诊断的金标准? [J]. 现代泌尿外科杂志, 2022, 27(2): 166.
- [18] El-Kassaby, A.W., Osman, T., Abdel-Aal, A., Sadek, M. and Nayef, N. (2003) Dynamic Three-Dimensional Spiral Computed Tomographic Cysto-Urethrography: A Novel Technique for Evaluating Post-Traumatic Posterior Urethral Defects. *BJU International*, **92**, 993-996. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410x.2003.04502.x>
- [19] Bhatt, S., Banerjee, A., Tandon, A., Dangwal, S. and Gupta, A. (2021) A Kaleidoscopic View of Male Urethral Pathologies on 64-Slice Multidetector Computed Tomographic Urethrography: A Novel Technique. *South African Journal of Radiology*, **25**, a1964. <https://doi.org/10.4102/sajr.v25i1.1964>
- [20] Oh, M.M., Jin, M.H., Sung, D.J., Yoon, D.K., Kim, J.J. and Moon, D.G. (2010) Magnetic Resonance Urethrography to Assess Obliterative Posterior Urethral Stricture: Comparison to Conventional Retrograde Urethrography with Voiding Cystourethrography. *Journal of Urology*, **183**, 603-607. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2009.10.016>
- [21] Horiguchi, A., Edo, H., Shinchi, M., Ojima, K., Hirano, Y., Ito, K., *et al.* (2022) Role of Magnetic Resonance Imaging in the Management of Male Pelvic Fracture Urethral Injury. *International Journal of Urology*, **29**, 919-929. <https://doi.org/10.1111/iju.14779>
- [22] El-ghar, M.A., Osman, Y., Elbaz, E., Refiaie, H. and El-Diasty, T. (2010) MR Urethrogram versus Combined Retrograde Urethrogram and Sonourethrography in Diagnosis of Urethral Stricture. *European Journal of Radiology*, **74**, e193-e198. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2009.06.008>
- [23] Revels, J.W., Wang, S.S., Weaver, J.S., Foreman, J.R., Gallegos, M.A., Thompson, W.M., *et al.* (2022) A Multimodality Review of Male Urethral Imaging: Pearls and Pitfalls with an Update on Urethral Stricture Treatment. *The British Journal of Radiology*, **95**, Article ID: 20211034. <https://doi.org/10.1259/bjr.20211034>
- [24] Shechekoturov, I.O., Bakhtiozin, R.F., Istranov, A.L. and Serova, N.S. (2022) Application of Volumetric Dynamic Voiding Computed Cysturethrography in Urethral Stricture Diagnosis before and after Reconstructive Surgery. *Russian Electronic Journal of Radiology*, **12**, 124-131. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2022-12-2-124-131>

- [25] Osman, Y., El-Ghar, M.A., Mansour, O., Refaie, H. and El-Diasty, T. (2006) Magnetic Resonance Urethrography in Comparison to Retrograde Urethrography in Diagnosis of Male Urethral Strictures: Is It Clinically Relevant? *European Urology*, **50**, 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2006.01.015>
- [26] Krukowski, J., Kałużny, A., Kłacz, J. and Matuszewski, M. (2018) Comparison between Cystourethrography and Sonourethrography in Preoperative Diagnostic Management of Patients with Anterior Urethral Strictures. *Medical Ultrasonography*, **20**, 436-440. <https://doi.org/10.11152/mu-1613>
- [27] McAninch, J.W., Laing, F.C. and Jeffrey, R.B. (1988) Sonourethrography in the Evaluation of Urethral Strictures: A Preliminary Report. *Journal of Urology*, **139**, 294-297. [https://doi.org/10.1016/s0022-5347\(17\)42391-3](https://doi.org/10.1016/s0022-5347(17)42391-3)
- [28] Morey, A.F. and Aninch, J.W.M.C. (2000) Sonographic Staging of Anterior Urethral Strictures. *Journal of Urology*, **163**, 1070-1075. [https://doi.org/10.1016/s0022-5347\(05\)67696-3](https://doi.org/10.1016/s0022-5347(05)67696-3)
- [29] Bryk, D.J., Khurana, K., Yamaguchi, Y., Kozirovsky, M., Telegrafi, S. and Zhao, L.C. (2016) Outpatient Ultrasound Urethrogram for Assessment of Anterior Urethral Stricture: Early Experience. *Urology*, **93**, 203-207. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2016.03.016>
- [30] Buckley, J.C., Wu, A.K. and McAninch, J.W. (2012) Impact of Urethral Ultrasonography on Decision-Making in Anterior Urethroplasty. *BJU International*, **109**, 438-442. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410x.2011.10246.x>
- [31] Miszewski, K., Krukowski, J., Miszewska, L., Kulski, J., Stec, R., Skrobisz, K., *et al.* (2025) Seeing the Stricture Clearly: Independent Determinants of Sonourethrography Precision in Urethral Stricture Disease. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 4453. <https://doi.org/10.3390/jcm14134453>
- [32] Geavlete, P., Cauni, V. and Georgescu, D. (2005) Value of Preoperative Urethral Ultrasound in Optic Internal Urethrotomy. *European Urology*, **47**, 865-871. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2004.10.019>
- [33] Heidenreich, A., Derschum, W., Bonfig, R. and Wilbert, D.M. (1994) Ultrasound in the Evaluation of Urethral Stricture Disease: A Prospective Study in 175 Patients. *British Journal of Urology*, **74**, 93-98. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410x.1994.tb16553.x>
- [34] Gupta, N., Dubey, D., Mandhani, A., Srivastava, A., Kapoor, R. and Kumar, A. (2006) Urethral Stricture Assessment: A Prospective Study Evaluating Urethral Ultrasonography and Conventional Radiological Studies. *BJU International*, **98**, 149-153. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410x.2006.06234.x>
- [35] Mikolaj, F., Karolina, M., Oliwia, K., Jakub, K., Adam, K., Mariusz, B., *et al.* (2021) Retrograde Urethrography, Sonourethrography and Magnetic Resonance Urethrography in Evaluation of Male Urethral Strictures. Should the Novel Methods Become the New Standard in Radiological Diagnosis of Urethral Stricture Disease? *International Urology and Nephrology*, **53**, 2423-2435. <https://doi.org/10.1007/s11255-021-02994-5>
- [36] Sehgal, N. and Priyadarshi, V. (2024) Impact of Adding Urethral Sonography with Retrograde Urethrography in Preoperative Assessment of Anterior Urethral Stricture. *Journal of Medical Ultrasound*, **32**, 209-214. https://doi.org/10.4103/jmu.jmu_4_23
- [37] Chung, P.H., Leong, J.Y., Machado, P., Wessner, C.E., Trabulsi, E.J., Halpern, E.J., *et al.* (2022) Contrast-Enhanced Ultrasound and Shear Wave Elastography: Novel Methods for the Evaluation of Urethral Stricture Disease. *Journal of Urology*, **207**, 152-160. <https://doi.org/10.1097/ju.0000000000002146>
- [38] Berná-Mestre, J.d.D., Balmaceda, T., Martínez, D., Escudero, J.F., Martínez, G., García, J.A., *et al.* (2018) Optimisation of Sonourethrography: The Clamp Method. *European Radiology*, **28**, 1961-1968. <https://doi.org/10.1007/s00330-017-5211-3>
- [39] 何萍, 崔立刚. 经尿道内对比增强超声在尿道狭窄中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(4): 353-357.
- [40] 邓超, 戴正皓, 郭航, 钟李长, 燕东亮, 徐月敏, 梁涛. 增强尿道超声联合剪切波弹性成像在尿道狭窄中的应用研究[J]. 中国医师进修杂志, 2025, 48(8): 716-719.
- [41] Ophir, J., Céspedes, I., Ponnekanti, H., Yazdi, Y. and Li, X. (1991) Elastography: A Quantitative Method for Imaging the Elasticity of Biological Tissues. *Ultrasonic Imaging*, **13**, 111-134. <https://doi.org/10.1177/016173469101300201>
- [42] Shiina, T., Nightingale, K.R., Palmeri, M.L., Hall, T.J., Bamber, J.C., Barr, R.G., *et al.* (2015) WFUMB Guidelines and Recommendations for Clinical Use of Ultrasound Elastography: Part 1: Basic Principles and Terminology. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **41**, 1126-1147. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2015.03.009>
- [43] Talreja, S.M., Yadav, S.S., Tomar, V., Agarwal, N., Jaipal, U. and Priyadarshi, S. (2016) 'Real-Time Sonoelastography' in Anterior Urethral Strictures: A Novel Technique for Assessment of Spongiobrosis. *Central European Journal of Urology*, **69**, 417-424.
- [44] Tondro Anamag, F., Sedigh, O., Tarzamni, M.K., Mohammadi, M., Buffi, N.M., Palminteri, E., *et al.* (2024) Shear Wave Elastography in Assessing Spongiobrosis of Urethral Stricture: Is It Clinically Useful? *Academic Radiology*, **31**, 3266-3271. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2024.01.048>
- [45] Chen, L., Feng, C., Lv, X., Fan, H., Joshi, P., Barbagli, G., *et al.* (2018) Three-Dimensional Computerized Model Based

- on the Sonourethrogram: A Novel Technique to Evaluate Anterior Urethral Stricture. *Journal of Urology*, **199**, 568-575. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.08.098>
- [46] 冯超, 申玉兰, 陈磊, 张素, 吕相国, 撒应龙, 胡兵, 傅强, 徐月敏. 多模态三维影像重建技术在尿道狭窄诊断中的应用[J]. 中华泌尿外科杂志, 2018, 39(5): 367-371.
- [47] Feng, C., Lu, Q.J., Xue, J.D., Shu, H., Sa, Y., Xu, Y., *et al.* (2024) Optimizing Anterior Urethral Stricture Assessment: Leveraging AI-Assisted Three-Dimensional Sonourethrography in Clinical Practice. *International Urology and Nephrology*, **56**, 3783-3790. <https://doi.org/10.1007/s11255-024-04137-y>
- [48] 郝云武, 卢友路, 范欣欢, 陈德钢. 3D 打印联合超声术中导航在球膜部尿道狭窄诊疗中的应用[J]. 中国男科学杂志, 2024, 38(5): 58-62.
- [49] Chitrakar, A., Adhikari, B., Mishra, U., Shah, A.K., Basnet, R.B., Shrestha, P.M., *et al.* (2025) Sono-Urethrogram versus Conventional Urethrogram in the Assessment of Urethral Stricture Disease: A Prospective Comparative Study. *Asian Journal of Urology*, **12**, 262-266. <https://doi.org/10.1016/j.ajur.2024.07.003>
- [50] Bach, P. and Rourke, K. (2014) Independently Interpreted Retrograde Urethrography Does Not Accurately Diagnose and Stage Anterior Urethral Stricture: The Importance of Urologist-Performed Urethrography. *Urology*, **83**, 1190-1194. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2013.12.063>
- [51] Durojaiye, M., Ogunjimi, M.A., Ojewola, R.W. and Arogundade, R. (2025) Diagnostic Yields of Sonourethrography and Retrograde Urethrography in Adult Males with Anterior Urethral Strictures Disease a Prospective Comparative Study. *Pakistan Journal of Urology (PJU)*, **2**, 123-132. <https://doi.org/10.69885/pju.v2i02.69>
- [52] Gong, E.M., Arellano, C.M.R., Chow, J.S. and Lee, R.S. (2010) Sonourethrogram to Manage Adolescent Anterior Urethral Stricture. *Journal of Urology*, **184**, 1699-1702. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2010.03.074>
- [53] Barnewolt, C.E., Acharya, P.T., Aguirre Pascual, E., Back, S.J., Beltrán Salazar, V.P., Chan, P.K.J., *et al.* (2021) Contrast-Enhanced Voiding Urosonography Part 2: Urethral Imaging. *Pediatric Radiology*, **51**, 2368-2386. <https://doi.org/10.1007/s00247-021-05116-6>